



Received: 2019/11/10  
Revised: 2019/12/28  
Accepted: 2020/02/08  
Published: 2020/03/24

**\*Corresponding Author:**

**Sangmin Byun**

Tel: +82-2-880-8336

Fax: +82-2-880-8336

E-mail: bluemetal7@snu.ac.kr

# 관성 핵융합의 군사적 의의와 고에너지밀도 플라즈마 시뮬레이션 결과

## Inertial Confinement Fusion in Defense and High Energy Density Plasma Simulation Result

변상민<sup>1\*</sup>, 나용수<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 원자핵공학과 박사과정

<sup>2</sup>서울대학교 원자핵공학과 교수

Sangmin Byun<sup>1\*</sup>, Yong-Su Na<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph.D course student, Dept. of Nuclear Engineering, Seoul National University

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Nuclear Engineering, Seoul National University

### 1. 서론

핵융합(fusion)은 이중수소와 삼중수소와 같은 두 개의 가벼운 원자핵이 부딪혀 하나의 원자핵으로 변환하는 반응으로 이 과정에서 발생하는 질량결손으로 인해 에너지가 발생하는 반응이다. 반면, 핵분열(fission)은 우라늄이나 플루토늄과 같은 무거운 원자가 분열하면서 발생하는 에너지를 이용하는 반응을 말한다. 핵융합을 구현(具現)하기 위해서는 원자 내 원자핵과 전자를 분리시켜 원자핵끼리 충돌할 수 있는 고온, 고압의 플라즈마 상태를 만들고 장시간 가두어야 하는데 이를 위한 대표적인 방법으로 자장가둠(magnetic confinement), 관성가둠(inertial confinement), 중력가둠(gravitational confinement) 방법이 있다.

이 중 관성가둠 기술은 수소폭탄의 기반이 되는 기술로서 선진국에서도 기술 전반을 군사기술로 간주하여 접근이 쉽지 않다는 제한점이 있으며 최근에서야 이를 활용한 기술들이 학계에서 개방하고 있다.

하지만, 오늘날 현실화(現實化)된 북핵(北核) 위기와 한반도 안보상황을 고려하면 군(軍)의 관성핵융합 기술에 대한 이해와 연구는 필수적이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 수소폭탄의 원리인 관성 핵융합과 고에너지밀도 플라즈마의 개념에 대해 소개하고 이와 관련된 레이저 폭발, 세선(細線) 폭발 등 다양한 고에너지밀도 플라즈마 현상을 소개하고 전산모사 결과를 제시하고자 한다. 또한, 이를 이용한 국방 분야의 다양한 활용성과 해외의 사례를 소개하고 연구의 필요성을 강조하고자 한다.

### Abstract

핵융합을 위한 대표적인 방법으로 자장가둠, 관성가둠, 중력가둠이 있다. 이 중 수소폭탄 기술인 관성 핵융합은 군사적인 잠재성으로 인하여 미국, 러시아와 같은 선진국의 국가 연구소에서 오랜 기간 연구가 이루어졌다. 그러나 국내의 경우 해외 연구결과와 기밀성과 여러 제약으로 연구기반이 미비한 실정이다. 작금(昨今)의 한반도의 안보 환경과 현실화된 핵 위협을 고려하면 관성 핵융합 연구는 국가 차원의 지지(支持)와 노력이 필요하다. 본 연구는 관성 핵융합의 전반을 소개하고 고에너지밀도 플라즈마 현상과 연관된 레이저, 세선(細線) 폭발 플라즈마에 대하여 소개하였다. 더불어 자기유체역학 코드를 이용하여 레이저 폭발, 세선(細線) 폭발 플라즈마 거동을 모사하였다.

Magnetic confinement, inertial confinement, and gravitational confinement are widely known for realizing nuclear fusion. Among them, Inertial confinement fusion(ICF), which is the origin of the hydrogen bomb, have been widely performed by several representative national laboratories such as Lawrence Livermore Laboratory(US), Lebedev Physical Institute(Russia), etc, for a long history. However, ICF in domestic is rarely studied due to the confidentiality and other various restriction. Considering the present nuclear threat in the Korean peninsula and national security environment, ICF should be actively studied and supported in the meaning of national security. The paper briefly outlines the origin of ICF and introduce high energy density plasma(HEDP), describes the laser ablation and wire implosion plasma. Also, pertinent simulation result using resistive MHD code will be shown with governing equation and physics model. Finally, the applications of ICF in defense will be introduced and underly the potential of the application in defense.

### Keywords

ICF(관성 핵융합),  
HEDP(고에너지밀도 플라즈마),  
Magneto-Hydrodynamic(자기유체역학)

### Acknowledgement

본 연구는 서울대학교와 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

본 논문은 해군과학기술학회 2019년 추계학술대회 발표논문을 기반으로 작성되었습니다.

## 2. 관성 핵융합

관성 핵융합은 짧은 시간(~ns 스케일)에 핵융합 연료(중수소와 삼중수소 캡슐)를 대상으로 고온, 고압의 조건을 조성하여 핵융합을 달성하는 방법이다. 이를 위해 중수소와 삼중수소 등으로 구성된 작은 타겟(mm 스케일)에 고에너지 레이저나 입자빔을 조사하거나 펄스파워 전류를 흘려줌으로써 폭발과 함께 1 Mbar 이상의 강력한 내부 압축조건을 발생시킴으로써 핵융합을 일으킨다.

역사적으로 관성 핵융합은 1952년 11월 1일 태평양에서 코드명 Ivy Mike 수소폭탄실험으로 최초로 실현되었다. Teller-Ullam 구조로도 알려진 수소폭탄 구조는 Fig. 1과 같이 작은 원자폭탄을 1차 폭발시켜 방사선 내부폭발(radiation implosion)을 발생한 후 이를 활용하여 2차 기폭제인 중수소와 삼중수소가 융합될 수 있는 조건을 달성함으로써 폭발위력을 증대시켰다.

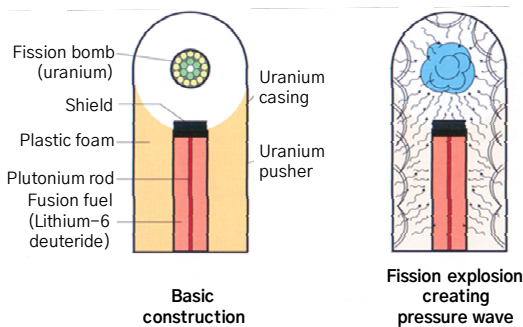


Fig. 1. Teller-Ullam configuration

오늘날 관성 핵융합은 고온, 고압의 압축조건을 위하여 고에너지의 레이저를 타겟에 조사하거나 원통형 금속용기 구조를 폭발시켜 내부 압축이 이루어지는 현상을 활용한다. 대표적인 관성 핵융합 방식으로는 직접방식(direct drive)과 간접방식(indirect drive)이 있다.

### 2.1 직접방식(Direct Drive)

직접방식은 연료 타겟에 레이저를 직접 조사함으로써 생성되는 폭발과 내부압축 현상을 이용한다. 통상, 5 mm 이하의 중수소와 삼중수소로 구성된 작은 캡슐을 타겟으로 사용하며 여러 방향에서 고에너지 레이저를 타겟에 균일하게 조사(照射)시킨다. 이때 외부의 폭발로 인해 내부 방향으로 강한 충격파가 전달되며 이 충격파로 인해 물질의 압축이 발생한다. 이러한 현상으로 타겟 내부밀도는 남의 20 ~ 100

배(~ 106 kg/m<sup>3</sup>), 1억도(10 keV) 이상의 압력과 온도가 형성된다. 직접방식은 Fig. 2와 같이 수 밀리미터의 작은 타겟에 균일한 압축을 위하여 매우 정밀하게 배열된 레이저를 사용해야 한다는 어려움이 있다.

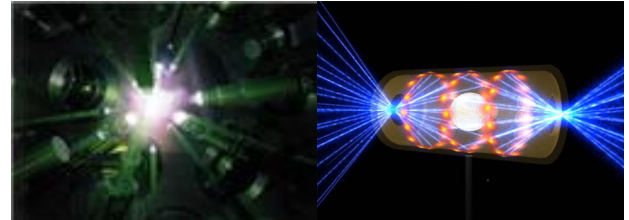


Fig. 2. Direct drive (left), indirect drive (right)[1]

### 2.2 간접방식(Indirect Drive)

간접방식은 홀라움(hohlraum) 이라고 하는 높은 원자번호(High Z) 물질로 구성된 용기에 핵융합 타겟을 넣고 레이저를 홀라움 벽에 고르게 조사함으로써 발생하는 X-ray를 이용한다. 이는 수소폭탄의 원리와 거의 일치한다. Fig. 2와 같이 홀라움 벽에 레이저 빔이 조사되면 강한 에너지의 soft X-ray(SRX)가 발생하는데 이때 발생한 X-ray가 내부의 연료 캡슐을 폭발시키면서 강한 내부압축이 발생한다. 간접방식은 직접방식과 달리 연료 캡슐에 정밀하게 직접 레이저를 조사할 필요가 없다는 점에서 효율적이다. 하지만 X-ray와 압축이 이루어지는 타겟 간의 에너지 커플링 현상의 어려움과 홀라움 제작방법이 군사기술과 직결되는 만큼 접근이 어렵다는 단점이 있다.

### 2.3 관성 핵융합 연구현황

관성 핵융합 연구는 선진국 주도로 군사 분야와 밀접하게 연계하여 발전되어왔다. 대표적으로 미국의 로렌스 리버모어 연구소(Lawrence Livermore Laboratory), 산디아 국립 연구소(Sandia National Laboratory), 러시아의 Lebedev Physical Institute 등 연구소들과, 프랑스의 레이저 메가줄(Laser Mega Joule), 영국의 오메가(OMEGA) 장치 등이 있으며 이외에도 중국 등에서도 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 또한, 대학 규모의 연구로는 미국의 코넬대학교, 영국의 임페리얼 컬리지, 로체스터 대학교, 중국의 칭화대학교 등이 있으며 대부분 국가연구소와 연계하여 많은 연구를 진행하고 있다. Fig. 3은 관성 핵융합과 관련된 대표적인 실험 장치로서 미국의 로렌스 리버모어 연구소의 NIF(National Ignition Facility)와 Z Machine을 나타낸 그림이다.

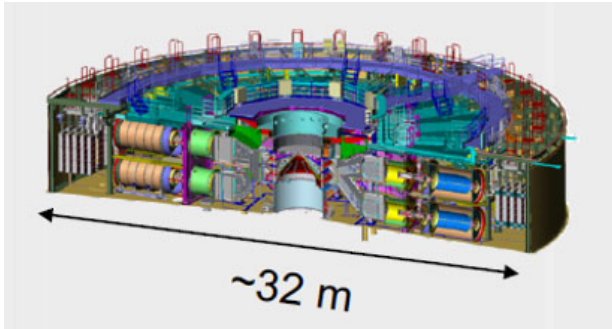
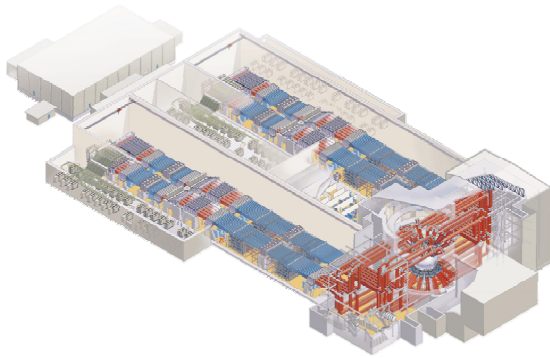


Fig. 3. Laser facility (above), pulsed power facility (below) [1]

NIF는 150 m의 규모로 강력한 레이저 장치로서 192개의 레이저를 타겟에 동시에 조사할 수 있다. Z-machine은 반경 32 m 규모로 ns 스케일, 최대 1MJ의 전기에너지를 수 밀리미터 또는 센티미터 크기의 타겟에 흘려줄 수 있다. 이를 활용하여 관성 핵융합, X-ray 발생원, 중성자원 및 천체물리학 현상 등을 위한 다양한 연구를 수행하고 있으며, 연구 결과의 많은 부분이 국방 분야 기술로 활용되고 있다.

### 3. 고에너지밀도 플라즈마

물질의 네 번째 상태로 알려진 플라즈마는 이온과 전자가 분리된 이온화된 기체 상태를 말한다. 이온과 전자의 분리로 인해 하전입자의 성질을 가지며 높은 전기전도도와 전기장에 의해 쉽게 가속되는 성질이 있다. 이 중 고에너지밀도 플라즈마는 1 Mbar(대기압의 106배)의 극한의 압력상태에 있는 플라즈마를 말한다. 관성 핵융합 대부분이 고에너지밀도 플라즈마 조건에서 이루어지기 때문에 이러한 연구는 관성 핵융합과 밀접한 관련이 있다. 고에너지밀도 플라즈마는 일반 공정 플라즈마나 자장가둠 플라즈마에 비해 밀도가 1010배 이상 높기 때문에 기존 플라즈마와는 다른 특성을 갖는다. Table 1은 중력가둠, 자장가둠, 그리고 관성가둠 방식의 플라즈마 특성을 비교한 표이다.

Table 1. 플라즈마 밀도, 온도, 가둠시간[1]

구분	중력가둠	자장가둠	관성가둠
밀도	$10^4 \times \text{Solid}$	$\text{Solid} / 10^8$	$10^3 \times \text{Solid}$
온도	1 keV	10 keV	10 keV
가둠시간	$10^5 \text{ years}$	1 sec - 100 sec	$10^{-9} \text{ sec} - 10^{-10} \text{ sec}$

고에너지밀도 플라즈마 현상을 연구하기 위한 대표적인 방법은 레이저를 활용한 방법과 고전압 펄스장치를 활용한 방법이 있다. 강한 파워를 짧은 시간(~ns 스케일) 내에 물질에 집중시킴으로써 발생하는 현상들을 연구하며, 이를 통해 핵융합, 중성자원, X-ray원과 같은 다양한 목적으로 활용한다.

#### 3.1. 레이저를 이용한 방법

레이저를 물질에 조사(照射)하면 물질 표면에서 급격한 삭마(ablation) 현상으로 인해 플라즈마 상태인 코로나가 발생하면서 외부로 날아가게 된다. 동시에 로켓 폭발현상(rocket blow-off)에 따른 충격파가 발생하며 물질 내부로는 충격파가 전파되어 압축이 진행된다. 이러한 코로나 형성(corona formation), 삭마(ablation), 압축(compression)의 단계를 거쳐 물질 내부의 온도와 밀도가 증가하면서 고에너지밀도 플라즈마가 발생하며 이후 시간이 지나면서 플라즈마는 불안정성에 의해 붕괴한다. 레이저를 이용한 플라즈마 압축을 위해서는 고에너지의 레이저를 짧은 펄스주기로 지속적으로 조사하는 것이 중요하다.

Fig. 4는 레이저를 이용한 방법 중 직접방법과 간접방법에 따른 타겟 압축과정을 설명한 그림이다.

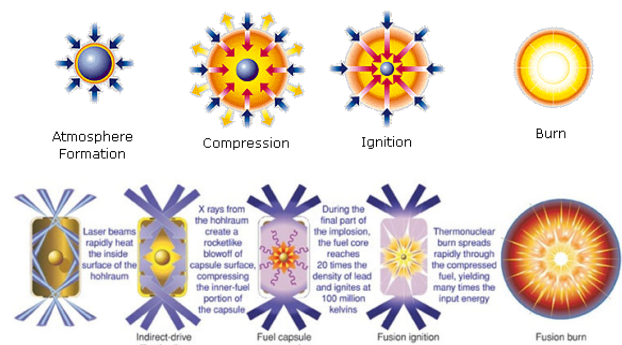


Fig. 4. Laser facility (left), pulsed power facility (right) [1]

### 3.2. 펄스전압장치를 이용한 방법

펄스전압장치를 이용한 고에너지밀도 플라즈마 연구중 많이 알려진 방법으로 Z-pinch가 있다. Z-pinch란 원통형 모양의 셸(shell) 또는 대칭적으로 배열한 세선(細線, wire)에 축방향(z 방향)으로 강한 펄스 전류를 흘려줌으로써 강한 전자기력을 형성하여 플라즈마를 압축시키는 것을 말한다. 보통 진공상태에서 원통형의 구조에서 세선을(wire)를 대칭적으로 배열하거나 내부에 다양한 가스를 주입하기도 하고 여러 겹의 구조(nested array)를 구성하는 등 다양한 물질과 상태, 구조 등을 달리하며 생성되는 고에너지밀도 플라즈마 현상을 연구한다. 또한, 압축효율을 증가시키기 위해 축 방향으로 자기장을 걸어주기도 하고, 레이저를 조사(照射)시킴으로써 연료를 사전가열 및 이온화시키는 방법을 이용하기도 한다. 본 논문에서는 대표적인 Z-pinch 실험 중 진공상태에서 원통형 세선(細線) 구조를 폭발시켜 플라즈마를 압축하는 현상을 자기유체역학 코드를 이용하여 모사하였다.

## 4. 시뮬레이션 모델

본 논문에서는 2차원 오일러리안(Eulerian) 기반의 자기유체역학 코드인 GORGON 코드와<sup>[2]</sup> 유체역학, 자기유체역학 현상을 해석할 수 있는 FLASH 코드를 활용하여 관성 핵융합 현상 중 하나인 레이저에 의한 방법과 펄스전류에 의한 플라즈마 압축현상을 모사하였다. 먼저 이러한 현상을 기술하기 위한 자기유체역학 지배방정식을 소개하고 각 모델의 간단한 물리 현상과 시뮬레이션 결과를 소개하고자 한다.

### 4.1 자기유체역학 지배방정식

플라즈마는 이온과 전자가 분리된 상태의 하전입자이지만 집단거동(collective behavior) 특성으로 인해 유체요소로 가정하여 전반적인 영역(macrosopic)에서의 거동모사가 가능하다. 이러한 플라즈마의 유체성질을 설명하기 위해서는 이상 자기유체(ideal MHD) 라는 가정을 하는데 이는 입자 간의 강한 충돌성(strong collisionality), adiabatic compression, 드바이 차폐(Debye shielding)의 거리 스케일이라는 가정을 한다. 다시 말하면, 입자 간의 충돌로 인한 열평형, 플라즈마 이온의 입자 거동에 비해 상대적으로 느린  $\mu s$  이상의 시간 스케일 정도의 시스템 변화와 전자에 의

해 이온의 쿨롱 에너지가 드바이 거리만큼 차폐가 이루어진다는 가정을 의미한다.

고에너지밀도 플라즈마도 전반적으로는 잘 알려진 이상 자기유체 가정을 통한 모사가 가능하나 고체-액체-기체의 상 변화가 급격히 이루어지는 영역과 짧은 시간 고전류( $I > 1 MA$ )로 인해 충돌성이 낮은 영역(collisionless regime)에서는 이러한 가정을 보완할 수 있는 물리 모델이 필요하다. 따라서, 상 변화가 이루어지는 WMD(warm dense matter)와 같은 물질상태에서의 상태방정식의 수정과 전기적 전도도, 열전도도와 같은 수송계수(transport coefficient)에 대한 보완이 필요하며, 방사선의 영향이 중요해지므로 물질에 대한 보다 정밀한 데이터가 요구된다. 이러한 현상을 기술하기 위해서 이상 자기유체역학 지배방정식을 보완한 resistive 자기유체역학 지배방정식을 사용한다.

소개된 시뮬레이션에서는 하나의 유동(single fluid)에 이온과 전자의 2개의 온도(two temperatures)를 가정하여 플라즈마를 기술하였으며 지배방정식은 식(1)-(6)과 같다. 이 중 식(1)-(3)은 질량보존식, 운동량보존식, 이온과 전자에 의한 에너지보존식을 의미한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla (p_i + p_e) + \vec{j} \times \vec{B} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_i \vec{u}) = -p_i \nabla \cdot \vec{u} + \nabla \cdot (\kappa_i \nabla T_i) + \vec{\Delta}_{ie} \quad (3a)$$

$$\frac{\partial \epsilon_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_e \vec{u}) = -p_e \nabla \cdot \vec{u} + \nabla \cdot (\kappa_e \nabla T_e) + \eta |\vec{j}|^2 - Q_{rad} + \vec{\Delta}_{ei} \quad (3b)$$

또한, 맥스웰 방정식으로부터 유도되는 자기장과 전류밀도는 식(4)-(5)와 같다.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times \left( \frac{\eta}{\mu_0} \nabla \times \vec{B} - \vec{\mu} \times \vec{B} \right) \quad (4)$$

$$\vec{j} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{B} \quad (5)$$

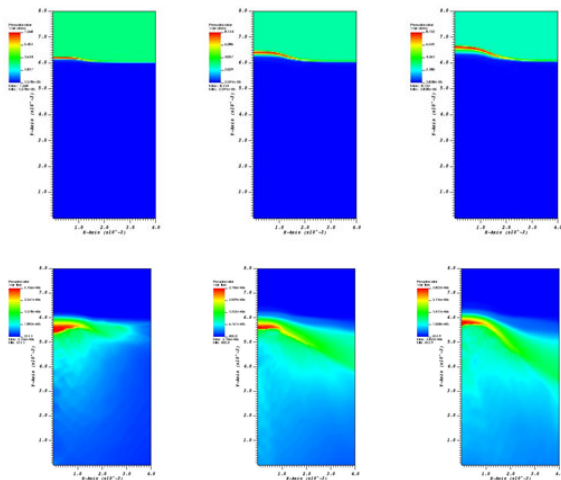
식 (6)은 앞서 설명한 상태방정식(equation of state)을 나타내며 물질의 압력과 에너지는 밀도와 온도에 대한 함수로 정의한다. 더욱 정확한 모사를 위해서 실험 기반의 테이블 형태의 데이터를 적용하기도 한다.

$$p_{i,e} = p_{i,e}(\rho, T), \quad \epsilon_{i,e} = \epsilon_{i,e}(\rho, T) \quad (6)$$

#### 4.2. 레이저를 통한 삭마(Ablation) 시뮬레이션

자자유체역학 코드인 FLASH를 활용한 예시 중 단일 레이저를 알루미늄 디스크에 조사함으로써 발생하는 현상을 소개하고자 한다.  $(r, z)$  좌표계에서  $3.2 \text{ W/cm}^2$  파워의 가우시안 레이저 빔을 45도 각도로 알루미늄에 조사하고 챔버는 헬륨 기체를 채운 상태를 설정하였다. 알루미늄의 밀도는  $2.7 \text{ g/cm}^3$ , 챔버 내 밀도는  $1.0 \text{ g/cm}^3$ 로 헬륨 기체로 채워졌으며 초기온도는  $0.025 \text{ eV}$ 로 설정하였다. 레이저가 조사되면서 알루미늄 표면에서 코로나 형성(corona formation), 삭마(ablation) 및 충격파 전달, 압축(compression)이 이루어지는 현상을 모사하였으며, 테이블 형태의 상태방정식을 적용함으로써 고에너지밀도 플라즈마 현상을 효과적으로 모사하였다.

Fig. 5는 시뮬레이션 설정값과 0.88 ns 시뮬레이션 시간 동안의 밀도, 이온의 온도 변화를 나타낸 결과다.

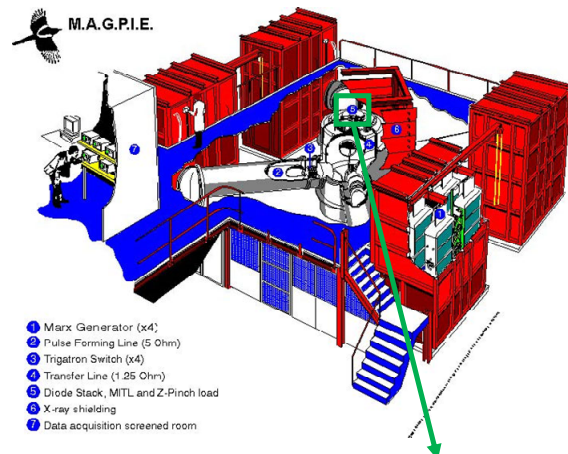


**Fig. 5.** Laser driven simulation Al disc (FLASH), density evolution (above), ion temperature (below)

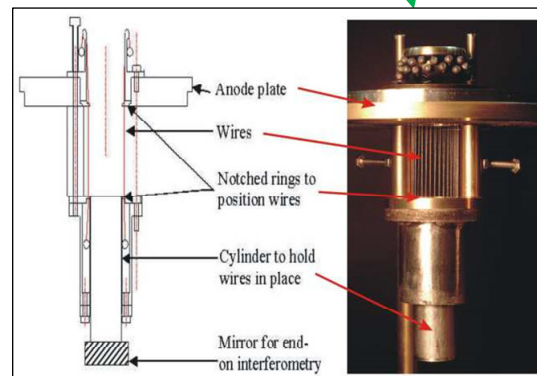
시뮬레이션 결과, 시간에 따라알루미늄 표면(초록색)에서 플라즈마가 형성되고 내부 방향으로 충격파에 의해 압축이 일어나는 현상을 볼 수 있다. 또한, 시간에 따라알루미늄 이온 온도 분포의 변화도 확인할 수 있다. 위 시뮬레이션 결과는 앞 절에서 설명한 레이저 입사에 따른 코로나 형성(corona formation), 삭마(ablation), 압축(compression)의 단계별 플라즈마 압축 현상을 확인할 수 있는 대표적인 예시이다.

#### 4.3. 펄스전류를 이용한 내부압축 시뮬레이션

Z-pinch를 위해서는 ns의 시간 스케일에 MA 수준의 고전압 펄스 전류를 생성할 수 있는 펄스파워장치가 필요하다. 펄스파워란 에너지를 축적했다가 짧은 시간에 방출하는 것을 의미하며, 타겟과 타겟에 전달되는 펄스전류의 파형에 의해 Z-pinch 플라즈마의 특성이 결정된다. 통상, Z-pinch는 다량의 X-ray 생성을 위해서 플라즈마가 축 방향으로 장시간 동안 압축상태를(stagnation phase)을 유지하도록 물질, 질량, 전류 파형 등을 최적화한다. 이를 위해 타겟의 밀도, 초기온도, 타겟의 실린더(array) 반경 뿐 아니라 전류의 최대 파워와 상승시간(rising time) 등을 종합적으로 고려해야 한다. 대표적인 대학교의 펄스 파워 실험 장치로는 영국 임페리얼 컬리지의 MAGPIE가 있으며 Fig. 6과 같이 ① Marx generator ② Pulse forming line ③ Trigratron switch ④ Transfer line ⑤ Z-pinch load ⑥ X-ray shielding ⑦ Data Acquisition and screened room으로 구성된다. 축전기를 통해 충전된 MA 크기의 펄스 전류는 ns 라는 짧은 시간스케일 내에 중앙에 위치할 수 cm의 크기의 작은 타겟에 집중된다.



- ① Marx Generator (x4)
- ② Pulse Forming Line (5 Ohm)
- ③ Trigratron Switch (x4)
- ④ Transfer Line (1.25 Ohm)
- ⑤ Diode Stack, MITL and Z-Pinch load
- ⑥ X-ray shielding
- ⑦ Data acquisition screened room



**Fig. 6.** Pulse power generator (MAGPIE, UK) [3]

이러한 펄스파워를 이용한 플라즈마 내부 압축현상을 모사하기 위해 resistive 자기유체역학 코드인 GORGON을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 실린더 형태 내 8개의 대칭적으로 배열된 구리 세선(wire)에 펄스전류를 순간적으로 흘려줌으로써 축 방향으로 압축되는 플라즈마 현상을 모사하였다.

Fig. 7과 같이 총 480 ns의 시간에서 최대전류 200 kA까지 상승하는 사인파(sinusoidal) 형태의 펄스 전류를 입력값으로 설정하였으며, 와이어의 두께 반경은  $5\ \mu\text{m}$ , 어레이 반경은  $2\ \text{mm}$ 로 설정하였다.

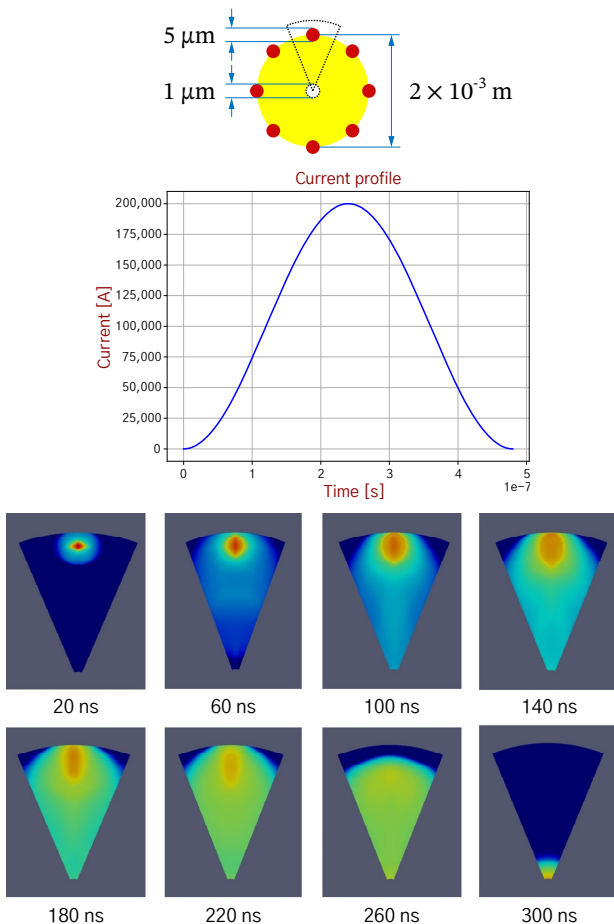


Fig. 7. Device configuration (above), current profile (middle), ion density evolution (right)

Fig. 7에서 나타나듯이 구리 플라즈마가  $2\ \text{mm}$ 의 작은 실린더 어레이(array) 안에서 펄스 전류가 전달됨에 따라 축 방향으로 압축되는 현상을 볼 수 있다. 위 시뮬레이션을 이용하여 다양한 물질(구리, 알루미늄, 텅스텐 등)에 대한 고에너지밀도 플라즈마의 거동을 계산할 수 있으며, 이를 이용하여 축 방향의 압축되는 정도와 이때 발생하는 방사선(X-ray) 방출 파워 등을 계산할 수 있다. 이와 같은 물리

현상은 선진국에서 대표적으로 연구하고있는 대상으로 관성 핵융합, X-ray원, 중성자 발생원 등 다양한 목적에 맞추어 연구할 수 있다.

## 5. 결론

오늘날 현실화(現實化)된 한반도 핵(核) 위협을 고려하면 관성 핵융합 연구는 국방 차원에서 많은 함의(含意)를 갖는다. 북한은 6차에 걸친 핵실험을 통해 수소폭탄 개발에 성공하였으며 한반도 핵무장에 대한 조심스러운 필요여론 등을 고려하면 관성 핵융합 기술에 대한 군(軍)의 사전준비는 필요하다.

먼저, 미국을 비롯한 중국에서는 이미 국가적인 지원 아래 국방 분야와 연계된 관성 핵융합 연구를 암암리에 진행하고 있으며, 이러한 기술 대부분을 국가기술로 간주함으로써 국내의 사전 연구와 자발적인 노력 없이는 기술 수준을 따라가기에 어려운 점이 많다. 이 중 관성 핵융합을 위한 물질의 상태방정식(EOS) 중군사분야활용에 잠재성이 높은 물질의 데이터의 경우 이러한 기밀성(機密性)으로 인해 현재까지도 베일에 싸여있다.

다음으로 관성 핵융합 기술은 엄청난 고에너지원 기술로서 국방 분야로의 다양한 활용이 가능하다. 미국의 로렌스 리버모어 연구소의 Z-machine 장치의 경우 최대 파워 280 TW, 2 MJ에 달하는 세계 기록의 X-ray를 발생시킨 바 있으며, 이러한 기술은 향후 수소폭탄 뿐 아니라 다양한 국방 무기 분야로 연계 활용이 가능하다.

마지막으로 관성 핵융합은 기술 특성상 일반 기업이나 민간 주도로는 개발이 어려우며 국가적인 지원과 관심이 필요한 연구 분야이다.

따라서, 관성 핵융합은 국가 차원의 의지(意志)가 없이는 발전(發展)이 어려우며 오늘날 핵 위협이 현실화된 한반도의 안보 상황을 고려하면 무엇보다도 군(軍)의 관심과 사전준비가 필요한 연구임을 강조하고자 한다.

## 참고문헌

- [1] Tammy Ma, "ICF on the NIF(National Ignition Facility)" 2019 HEDS summer school, 2019
- [2] D.-K. Kim et al, "Magnetohydrodynamics Simulation of Tungsten Wire in Wire-Array Z Pinch", Contrib. Plasma Phys. 50, No. 2, 2010. 115 - 120,
- [3] D.-K. Kim et al, "MHD Simulation of Wire Ablation and Implosion in Wire-Array Z Pinch" ICOPS, 2010